

УДК 524.3-36

ИЗУЧЕНИЕ ХОЛОДНЫХ СР-ЗВЕЗД С СИЛЬНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ САО

Е.А. Семенко, Д.О. Кудрявцев, Л.А. Кичигина

Аннотация

В статье представлены новые измерения магнитного поля химически пекулярных звезд HD 178892 и HD 201174. Подтверждено, что HD 178892 обладает рекордно сильным среди холодных СР-звезд магнитным полем. Впервые было обнаружено магнитное поле СР-звезды HD 201174. Кроссовер-эффект, свидетельствующий в пользу сложной структуры магнитного поля звезды HD 201174, был обнаружен в зеемановских спектрах. Изучение химического состава атмосферы HD 178892 в фазы, соответствующие минимальному и максимальному значению поля на поверхности, не выявило значимого изменения содержания основных химических элементов.

Ключевые слова: магнитное поле, СР-звезды, атмосфера, химический состав.

Введение

Согласно классификации Престона [1], поделившего все химически пекулярные звезды на 4 группы, большинство звезд с эффективной температурой от 8000 до 15000 К относится ко второй группе (СР2). У этих звезд наиболее сильно выражены химические аномалии, которые проявляются в значительном усилении или ослаблении спектральных линий некоторых химических элементов. Переизбыток тяжелых элементов у звезд СР2 может достигать 5 порядков, а недостаток легких – до 2 порядков.

За 60 лет, прошедших после открытия Г. Бэбкоком магнитного поля звезды 78 Vir [2], список магнитных звезд усилиями многих наблюдателей был расширен до 350 [3], и это число постоянно увеличивается. Величина магнитного поля у разных СР-звезд находится в пределах от сотен Гс до нескольких десятков кГс, а структура поля имеет простой, преимущественно дипольный характер. Большинство маломассивных СР2-звезд – относительно медленные ротаторы, периоды их вращения составляют порядка нескольких месяцев или лет. Однако поверхностные магнитные поля более 10 кГс и выше встречаются чаще всего у более горячих (эффективная температура более 10000–15000 К) и быстровращающихся звезд (с периодом менее 10 дней). Но и среди холодных СР-звезд были обнаружены объекты со сверхсильными магнитными полями: рекордно сильное магнитное поле звезды HD 154708, изучавшейся Хубриг и др. [4], достигает величины 24 кГс. Еще один объект с аналогичными характеристиками был обнаружен в Специальной астрофизической обсерватории (САО) Елькиным и др. [5]. Выполняя поиски новых магнитных звезд, у плохо изученной SrCrEu Ap-звезды HD 178892 они обнаружили магнитное поле, продольная компонента которого меняется от 2 до 7.5 кГс. Позднее Рябчиковой и др. [6] в спектрах высокого разрешения удалось обнаружить расщепленные эффектом Зеемана компоненты линий, что позволило измерить величину магнитного поля на поверхности звезды – 17.5 кГс. Такие сильные поля даже в сочетании с очень быстрым вращением не характерны для известных маломассивных Ap-звезд, что делает HD 178892 и HD 154708 интересными для изучения объектами.

Несмотря на то что звезда HD 178892 изучалась ранее, мы решили продолжить ее спектральный мониторинг на 6-м телескопе БТА САО РАН с целью детального изучения геометрии магнитного поля.

Принадлежность звезды HD 201174 к классу магнитных была установлена совсем недавно в САО РАН. Наблюдения этой звезды с анализатором круговой поляризации, начатые в 2006 г. на 6-м телескопе Д.О. Кудрявцевым, были продолжены, и в результате к настоящему моменту времени имеется 8 измерений продольного магнитного поля. В некоторых спектрах нами был обнаружен сильный кроссовер-эффект, свидетельствующий, как правило, о сложной геометрии магнитного поля. Представленные в настоящей работе сведения о продольном магнитном поле звезды HD 201174 позволяют нам ожидать большое поле на поверхности этого объекта.

1. Наблюдательный материал

Работа выполнена на основе анализа спектрального материала, полученного на 6-м телескопе БТА САО РАН. В период с момента публикации статьи Рябчиковой и др. [6] нами на БТА было получено дополнительно 9 зеемановских спектров с разрешением $\lambda/\Delta\lambda = 15000$. До марта 2010 г. на Основном звездном спектрографе, оснащённом анализатором круговой поляризации, в качестве приемника использовалась ПЗС-матрица EEV CCD 42-40 размером 2048×2048 элементов. Новый приемник EEV CCD 42-90, установленный на ОЗСП впоследствии, имеет размер 4600×2048 элементов при одинаковом с CCD42-40 физическом размере светочувствительного элемента. Таким образом, новые спектры имеют более чем в два раза больший спектральный диапазон, что позволяет повысить точность измерения продольной компоненты магнитного поля. Девять новых эшелле-спектров, пригодных для выполнения анализа химического состава звезды, были получены с использованием эшелле-спектрометра НЭС [7], установленного в фокусе Нэсмит-2 телескопа. В выдержке из журнала измерений спектров HD 178892, приведенной в табл. 1, содержится юлианская дата наблюдений. Аналогичные сведения о датах наблюдений звезды HD 201174 представлены в табл. 3.

Для обработки двумерных изображений были использованы два комплекса программ. Экстракция одномерных эшелле-спектров осуществлялась с применением REDUCE – комплекса программ на языке IDL, созданного Пискуновым и Валенти [8]. Последовательность обработки была стандартна: вычитание усредненного изображения электронной подложки (bias), коррекция неравномерной чувствительности элементов приемника и вычитание рассеянного света. Привязка к длинам волн выполнена по спектру источника Th–Ar. Зеемановские спектры, зарегистрированные на Основном звездном спектрографе, были экстрагированы в системе редукции данных MIDAS с помощью набора программ Zeeman [9]. Последовательность шагов обработки аналогична случаю эшелле-спектров.

Нормировка спектров на уровень континуума и объединение отдельных эшелле-порядков воедино выполнялись с помощью программы Continuum из состава IRAF.

2. Новый взгляд на магнитные свойства HD 178892

Новые измерения продольного B_e и поверхностного B_s магнитных полей, представленные в табл. 1, мы использовали для изучения геометрии общего магнитного поля звезды. Объединив опубликованные ранее в статье Рябчиковой и др. [6] данные о B_e и B_s с нашими измерениями (рис. 1), пришли к следующим результатам.

1. Величина магнитного поля на поверхности B_s изменяется с фазой вращения синусоидально от 16.6 до 23 кГс и в противофазе с продольной составляющей поля.

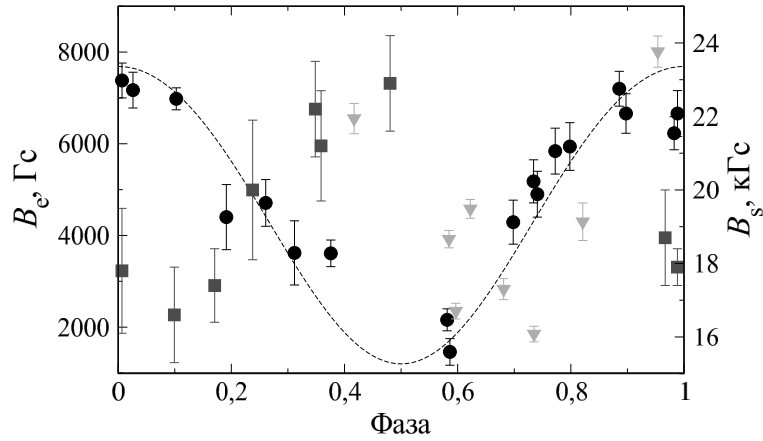


Рис. 1. Переменность магнитного поля звезды HD 178892 с периодом вращения $P = 8^{\text{d}}.2478$. Черные кружки – значения B_e из оригинальной работы [6], серые треугольники – наши измерения. Квадратные точки отвечают измерениям продольного поля B_s , представленным в настоящей работе

Табл. 1

Журнал измерений магнитного поля звезды HD 178892

HJD	$B_e \pm \sigma$, Гс		HJD	$B_s \pm \sigma$, кГс	
2 454 338.313	2350	170	2 453 599.380	17.8	1.7
2 454 488.632	4300	410	2 453 871.406	17.9	0.5
2 454 522.593	7780	320	2 454 030.171	20.0	1.9
2 454 610.394	3920	190	2 454 032.174	22.9	1.3
2 454 669.367	1850	170	2 454 308.360	18.7	1.3
2 454 955.424	7700	380	2 454 309.454	16.6	1.3
2 455 015.335	2830	230	2 454 318.290	17.4	1.0
2 455 460.236	4580	205	2 454 336.252	22.2	1.3
2 455 461.269	2790	166	2 453 599.380	17.8	1.7

2. Отдельные новые измерения продольного магнитного поля не согласуются с периодом переменности $P = 8^{\text{d}}.2478$, найденным Рябчиковой и др. [6].

3. Наблюдаемую переменность магнитного поля звезды можно описать с помощью модели, предложенной в статье [6], со следующими параметрами: напряженность поля на полюсе диполя B_p равна 23 кГс, угол наклона i оси вращения к лучу зрения равен 37° , а угол β между осью вращения звезды и осью диполя – 36° . Однако чтобы корректно описать переменность поверхностного поля (в противофазе с B_e), необходимо в модель ввести квадрупольную составляющую с напряженностью поля на полюсе квадруполья -40 кГс.

Таким образом, даже из поверхностного анализа переменности магнитного поля звезды можно сделать вывод, что структура поля достаточно сложная и представляет собой комбинацию диполя и квадруполья. К сожалению, для полного описания изменений B_s с фазой вращения нам не хватает наблюдений в фазах от 0.50 до 0.95. В сентябре 2010 г. нами были получены два спектра высокого разрешения в фазах 0.69 и 0.72, но эти данные еще не обработаны.

Ряд эшелле-спектров, которые были получены в моменты, когда поверхностное поле достигало экстремумов, были нами использованы для изучения спектральной переменности. С целью изучения химического состава было отобрано по несколько наименее блендированных линий железа, хрома, неодима и празеодима. Используя

Табл. 2

Содержание отдельных химических элементов в атмосфере HD 178892 в зависимости от величины B_s ; n – количество измеренных линий

Ион	$\log N/N_{\text{tot}}, \text{dex } (n)$	$\log N/N_{\text{tot}}, \text{dex } (n)$
	$B_s = 17 \text{ кГс}$	$B_s = 23 \text{ кГс}$
Fe I	-4.77 ± 0.32 (7)	-5.07 ± 0.35 (12)
Fe II	-4.80 ± 0.28 (2)	-5.17 ± 0.50 (3)
Cr I	-5.63 ± 0.20 (5)	-5.40 ± 0.14 (2)
Cr II	-5.07 ± 0.28 (7)	-5.40 ± 0.14 (2)
Nd II	-8.21 ± 0.38 (18)	-8.20 ± 0.23 (31)
Nd III	-7.14 ± 0.38 (4)	-7.36 ± 0.26 (5)
Pr II	-8.50 ± 0.30 (11)	-8.36 ± 0.31 (5)
Pr III	-7.60 (:))	-7.73 ± 0.50 (2)

Табл. 3

Журнал измерений магнитного поля звезды HD 201174

HJD	$B_e \pm \sigma, \text{ Гс}$
2 454 016.275	1740 80
2 454 402.349	1500 100
2 454 403.234	1950 85
2 455 075.488	810 80
2 455 077.469	–780 50
2 455 345.407	2260 90
2 455 431.507	1900 70
2 455 458.443	710 90
2 455 460.196	2113 50

метод моделей атмосфер и сравнивая теоретические профили линий с наблюдаемыми, были получены содержания элементов, приведенные в табл. 2. Параметры атмосферы звезды были взяты из статьи [6].

Как можно заключить из анализа табл. 2, содержание рассмотренных элементов не указывает на значимую зависимость от величины поверхностного поля звезды. Если проводить аналогию с более горячими звездами, имеющими неравномерное распределение элементов по поверхности, в химическом плане поверхность HD 178892 представляется достаточно однородной.

3. HD 201174 – новая магнитная звезда

Магнитное поле у этой слабой ($8^m 77$) СР-звезды было впервые найдено в САО РАН в результате измерения зеемановских спектров [3]. За 4 года наблюдений было получено 9 значений продольного магнитного поля (табл. 3), однако период вращения звезды по ним определить нельзя. Анализ фотометрических данных, полученных в ходе выполнения программы HIPPARCOS, выявил, что вероятный период должен быть равен около 6.15 сут. Эффективная температура звезды несколько меньше 10000 К [10], а тип химических аномалий – SrCrEu. Оценка содержания некоторых элементов, проведенная методом синтетических спектров, показала избыток редкоземельных элементов на 3–4 порядка, в избытке представлены также хром и железо.

Однако наибольший интерес представляет собой магнитное поле звезды. Детальный анализ зеемановских спектров установил, что в некоторые моменты

времени в линиях обнаруживается сильный кроссовер-эффект, который наблюдается обычно у звезд с очень сложным строением магнитного поля. Результаты определения продольного магнитного поля, основанные на измерении центров тяжести, показали переменный характер магнитного поля HD 201174 со значениями B_e от -800 до 2250 Гс. Кроссовер-эффект приводит к искажению формы линий, даже к их расщеплению, и свидетельствует о том, что в данной фазе наблюдаются одновременно два магнитных полюса. Предполагая дипольное строение магнитного поля, можно ожидать, что поле на поверхности звезды должно быть около 10 кГс.

Заключение

Представлены новые результаты изучения двух магнитных звезд – HD 178892 и HD 201174. Было установлено, что геометрия магнитного поля звезды HD 178892 отличается от дипольной и, по-видимому, присутствует квадрупольная составляющая. Между тем содержание некоторых наиболее представленных в спектре химических элементов практически не изменяется с фазой вращения, что можно трактовать как отсутствие химических неоднородностей на поверхности звезды.

Магнитное поле звезды HD 201174 впервые было измерено в САО. В настоящей статье были представлены новые измерения продольной составляющей магнитного поля звезды. О большой величине поверхностного поля и его сложном строении свидетельствует сильный кроссовер-эффект в зеемановских спектрах. В дальнейшем предполагается выполнить анализ химического состава HD 201174 на основе измерения эшелле-спектров, полученных в сентябре 2010 г.

Авторы выражают благодарность И.И. Романюку за ряд замечаний, способствовавших успешному проведению исследований, а также Комитету по тематике больших телескопов за выделенное наблюдательное время на 6-м телескопе САО.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (проект № П1194) при частичном финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 09-02-00002-а).

Summary

E.A. Semenko, D.O. Kudryavtsev, L.A. Kichigina. A Study of Cool CP Stars with Strong Magnetic Fields Using 6-m Telescope of SAO RAS.

New measurements of the magnetic field of chemically peculiar stars HD 178892 and HD 201174 are presented in the article. It has been confirmed that HD 178892 has an extremely strong magnetic field compared to other cool CP stars. First measurements of the magnetic field of the star HD 201174 have been carried out. A strong cross-over effect indicating the complex structure of the stellar magnetic field has been discovered in the Zeeman spectra of HD 201174. The analysis of chemical composition of the atmosphere of HD 178892 in phases when the magnetic field has its minimum and maximum has not revealed any variations in the abundance of the main chemical elements.

Key words: magnetic field, CP stars, atmosphere, chemical composition.

Литература

1. *Preston G.W.* The chemically peculiar stars of the upper main sequence // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 1974. – V. 12. – P. 257–277.

2. *Babcock H.W.* Zeeman Effect in Stellar Spectra // *Astrophys. J.* – 1947. – V. 105. – P. 105–119.
3. *Романюк И.И., Кудрявцев Д.О.* Магнитные поля химически пекулярных звезд. 1. Каталог магнитных СР-звезд // *Астрофиз. бюлл.* – 2008. – Т. 63, № 2. – С. 148–165.
4. *Hubrig S., Nesvacil N., Shöller M., North P., Mathys G., Kurtz D.W., Wolff B., Szeifert T., Cunha M.S., Elkin V.G.* Detection of an extraordinarily large magnetic field in the unique ultra-cool Ap star HD 154708 // *Astron. Astrophys.* – 2005. – V. 440, No 2. – P. L37–L40.
5. *Елькин В.Г., Кудрявцев Д.О., Романюк И.И.* Восемь новых магнитных звезд с большими депрессиями в континууме // *Письма в Астроном. журн.* – 2003. – Т. 29, № 6. – С. 455–460.
6. *Ryabchikova T., Kochukhov O., Kudryavtsev D., Romanyuk I., Semenko E., Bagnulo S., Lo Curto G., North P., Sachkov M.* HD 178892 – a cool Ap star with extremely strong magnetic field // *Astron. Astrophys.* – 2006. – V. 445, No 3. – P. L47–L50.
7. *Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д.* Спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА // *Оптич. журн.* – 2009. – Т. 76, Вып. 2. – С. 42–55.
8. *Piskunov N.E., Valenti J.A.* New algorithms for reducing cross-dispersed echelle spectra // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 385, No 3. – P. 1095–1106.
9. *Kudryavtsev D.O.* Reduction of echelle and long-slit Zeeman spectra in MIDAS // *Balt. Astron.* – 2000. – V. 9. – P. 649–651.
10. *Glagolevskij Yu.V.* A new list of effective temperatures of chemically peculiar stars. II // *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* – 1994. – V. 38. – P. 152–168.

Поступила в редакцию
24.12.10

Семенко Евгений Алексеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН.

E-mail: *sea@sao.ru*

Кудрявцев Дмитрий Олегович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Специальной астрофизической обсерватории РАН.

E-mail: *dkudr@sao.ru*

Кичигина Лилия Александровна – студент Казанского (Приволжского) федерального университета.